AUTOMAÇÃO E PROTEÇÃO DA DISTRIBUIÇÃO NA INTERNATIONAL DRIVE

por

James R. Fairman
Karl Zimmerman
Jeff W. Gregory
James K. Niemira

Introdução

A Florida Progress Corp., de St. Petersburg, Estado da Flórida, é uma empresa holding de concessionárias elétricas, diversificada, incluída no grupo Fortune 500. A sua principal subsidiária é a Florida Power Corporation (FPC), a segunda maior concessionária do estado, servindo a aproximadamente 1,4 milhões de consumidores, com uma taxa de crescimento de 2% por ano. O território de serviço da FPC abrange cerca de 20.000 milhas quadradas, em 32 condados nas áreas central e norte da Florida. Uma aquisição pendente da Florida Power Corp. pela Carolina Power and Light Energy irá resultar na formação de uma empresa que atende a 2,8 milhões de consumidores, em uma área de 50.000 milhas quadradas.

Incluída neste território de atuação fica a área em torno de Orlando, na Flórida, que constitui o destino turístico número um do mundo inteiro. Um dos principais destinos turístico é a área em torno da Internacional Drive (I-Drive), localizada ao sul de Orlando. As atrações da I-Drive consistem de grandes edificações alojando hotéis, shoppings, restaurantes e instalações dedicadas ao laser. A área é esteticamente muito agradável, incluindo urbanismo, vias urbanas e infra-estrutura de servidão requintadas. A I-Drive também serve de sede para o Centro de Convenções do Condado de Orange, com área de 4 milhões de pés quadrados. Concentrada em uma área com 3 milhas de extensão, a seção da I-Drive que será afetada por este projeto de proteção e automação consiste de mais de 500 clientes comerciais, com uma carga de ponta de 45 megawatts e uma receita bruta de mais de $13 milhões por ano. A cerca de ¼ de milha desta seção da I-Drive encontram-se os limites de serviço de uma concessionária elétrica vizinha. A ameaça competitiva exigiu o desenvolvimento de um sistema de distribuição com tecnologia de ponta com confiabilidade não usual, de modo a prevenir a fuga dos consumidores leais.

Antes deste projeto começar, I-Drive era atendida por 6 alimentadores radiais, incluindo 8 milhas de cabo subterrâneo de 1000 kcmil e 2 milhas de condutor 795 AAC aéreo. O sistema de distribuição em 13 kV incluía 16 chaves motorizadas, controladas pelo sistema SCADA existente da FPC, através de rádio de 900 MHz. Também, havia 21 conjuntos de manobra operados manualmente. Na década dos 90, ocorreram 29 faltas em nível de alimentador; 16 das quais aconteceram apenas no ano de 1998. Dez acidentes envolvendo escavações onde havia cabos e outras doze falhas de cabos causaram a maioria dessas faltas. Muitas dessas faltas foram prolongadas, devido ao mau desempenho do sistema SCADA e da impossibilidade das equipes de chegarem rapidamente a essa área congestionada da I-Drive. Isso era inaceitável. Diversos clientes importantes da I-Drive indicaram que um nível de atendimento razoável seria uma falta a cada 3 ou 4 anos. Assim foi o modo como o projeto nasceu.

No início do outono de 1998, uma equipe tática foi acionada com o objetivo de desenvolver e implementar tarefas de curto prazo que pudessem rapidamente mitigar o mau desempenho desse sistema de distribuição. O sistema SCADA existente foi analisado e ficou constatado que o mesmo era, no mínimo, questionável. O sistema de rádio não funcionava bem devido à interferência causada por árvores e prédios altos. As intensidades dos sinais de rádio foram medidas e antenas foram alinhadas na direção do melhor entre dois receptores. O aterramento de equipamento foi avaliado e aperfeiçoado. A condição dos cabos alimentadores subterrâneos foi analisada e constatada como em más condições. Como resultado, tanto de testes de descarga parcial como de teste de corrente de relaxamento, 27.000 pés de cabos alimentadores subterrâneos foram identificados para imediata substituição.

Dentro do mesmo prazo, uma equipe estratégica foi acionada para examinar oportunidades de longo prazo para fazer o nível de confiabilidade do serviço elétrico atingir o nível “esplêndido” que os nossos clientes exigem e merecem. Seis alternativas foram avaliadas, das quais quatro foram rejeitadas, uma vez que não abordavam adequadamente as questões de confiabilidade. Uma alternativa de comutação inteligente e uma alternativa de rede primária foram estudadas e selecionadas para desenvolvimento posterior. Esses sistemas precisariam ser instalados e estar operacionais até 20 de Outubro de 1999. Em 12 de Novembro de 1998, a FPC abriu uma licitação para um estudo de engenharia, recomendações e fornecimento de equipamentos. Solicitando aos fornecedores para considerarem ambos os tipos de sistemas em suas propostas, a FPC ficou em condições de assegurar que o sistema iria proporcionar o nível esplêndido de confiabilidade que os consumidores esperam e fazê-lo a um preço competitivo.

A alternativa de comutação inteligente teria um controlador microprocessado em cada localização de chave. Ele iria comunicar-se continuamente com os controladores nas chaves adjacentes para determinar e executar o melhor esquema de comutação para qualquer falta no alimentador. Isso seria um sistema em malha radial com um ponto normalmente aberto. O religamento seria incluído nos esquemas de proteção da subestação para eliminar as faltas e essas seriam isoladas pela ação de seccionalização das chaves durante o tempo morto entre os religamentos do circuito. Uma breve interrupção de vários segundos ocorreria enquanto as ações de comutação automática fecham o ponto normalmente aberto e restauram serviço para partes não afetadas do circuito. Essa alternativa requereria atualização dos conjuntos de manobra existentes, através da instalação de sensores, operadores de motor e controles (ou substituição dos conjuntos de manobra existentes por outros conjuntos novos dispondo dessas funções). Um sistema de comunicação também seria necessário.

A alternativa de malha primária usaria relés direcionais e conjuntos de manobra de interrupção de falta para dramaticamente reduzir as faltas em alimentadores. Com esse sistema, quando de uma falha uma seção de cabo em nível de alimentador subterrâneo, a eliminação automática da falta irá ocorrer antes que o disjuntor da subestação desligue. Os clientes irão ver apenas alguns ciclos de queda de tensão até que a falta seja liberada e nenhuma interrupção do abastecimento. Esse sistema de malha primária requereria a substituição de todos os conjuntos de manobra montados sobre base, a instalação de algumas derivações adicionais nos alimentadores e a instalação de 4 novos alimentadores subterrâneos. Também, os esquemas de relés e comunicações através fibra ótica seriam instalados. Tendo em vista que esses alimentadores ficariam em configuração de malha, com muitos pontos de ligação entre eles, não haveria nenhuma necessidade de religamento nos disjuntores dos alimentadores na subestação.

Uma avaliação de confiabilidade sobre ambas as alternativas foi conduzida para determinar o impacto do “Valor Perdido de Serviço” (LVOS) e a freqüência prevista de desligamentos. Os resultados daquele estudo de confiabilidade indicaram que tanto um sistema de comutação inteligente como um sistema de malha primária poderiam ser utilizados para reduzir o valor perdido de serviço. Um sistema de comutação inteligente não reduziria o número de faltas, porém reduziria a duração da falta para menos de 60 segundos para a maioria dos consumidores. Uma malha primária eliminaria faltas causadas por falha de cabo em nível de alimentador, porém teria um custo de instalação mais alto e seria uma alternativa de manutenção relativamente elevada.

A decisão não foi fácil. Os custos seriam significativos, perto de $8 milhões para a distribuição e as comunicações com fibra. A FPC precisava considerar tanto o custo quanto a confiabilidade na sua decisão de prover esses consumidores com um nível superior de serviço. Como a área geográfica se dividia naturalmente em dois tipos, com condutores aéreos na extremidade norte da I-Drive e cabo subterrâneo na extremidade sul, o projeto foi dividido em duas diferentes soluções. Para a parte aérea foi escolhida a solução com comutação inteligente. Para a parte subterrânea, a solução de malha primária (4 anéis) foi escolhida. Um meio robusto de comunicações entre cada uma das localizações das chaves nas duas partes do projeto foi selecionado como fibra ótica modo simples, totalmente multiplexada, instalada em três anéis de comunicação fechados. Esses laços de fibra ótica seriam configurações do tipo *hot stand-by*, com 4 fibras, totalmente redundantes. Todas as comunicações do sistema SCADA seriam através de DNP 3.0 de volta para as subestações. Lá os dados seriam concentrados e o protocolo seria convertido em protocolo do sistema antigo para ficar compatível com o sistema SCADA existente na FPC. Dados analógicos incluindo tensão e corrente trifásica, megawatts, megavars e diversos pontos de alarme e status seriam levados para o

concentrador de dados/conversores de protocolo. Acesso por telefone discado não foi incluído. Os registros das faltas seriam armazenados nos relés e nos controles das chaves inteligentes.

Os esquemas de proteção de relés precisavam ser suficientemente “confiáveis” para operar corretamente todas as vezes, “seguros” o suficiente para nunca operar incorretamente, “seletivos” o suficiente para isolar o menor segmento possível de cabo para qualquer falta, e “sensíveis” o suficiente para proteger para todos os tipos de faltas. Um grande esforço foi feito para manter a proteção com relés rápida, simples e eficaz em termos de custo. Nenhum ponto isolado de falha seria tolerado. Esses sistemas de operação seriam mantidos o mais simples possível para facilitar a operação e manutenção e a expansão do sistema.

Em Maio de 1999, foi assinado um contrato entre a FPC e a S&C para os serviços de engenharia. As instalações começariam em Junho de 1999. Todas as instalações e verificações do sistema teriam de ser concluídas até o final de Outubro de 1999. Os fabricantes de conjuntos de manobra e relés assumiram o compromisso com um cronograma de entregas bastante agressivo. Todos os fabricantes de equipamentos de comunicações, bem assim os fornecedores de cabos de força, comprometeram com esse cronograma. O fabricante dos equipamentos de comutação inteligente também se comprometeu. Arranjos foram feitos com os empreiteiros de construção que se encarregariam de abertura de valas e perfuração para o projeto. Providências foram tomadas referente ao suporte para a obra da parte da empresa. Este projeto contava com pleno suporte da FPC, desde os mais altos níveis da administração até os colaboradores individuais. Todos os participantes tomaram a decisão de serem vitoriosos e de fazerem isso “para ontem”. Nenhum jogo de empurra seria tolerado.

O desafio real deste projeto não era a instalação dos 28.000 pés ou a substituição dos 27.000 pés de cabo de alimentador subterrâneo existente. Não era a instalação dos 4 novos alimentadores, em 2 diferentes subestações. Não era o trabalho de restauração urbanística imediatamente após a execução do serviço. Não era a instalação de todos os conjuntos de manobra novos. Não era a instalação de mais de 90 relés direcionais. Não era o prazo quase impraticável. Não era o tempo e esforço de gerenciamento do projeto. A FPC faz essas coisas em bases quase que regulares. O desafio real era a integração de todas as tecnologias dentro dessa nova aplicação. Cada detalhe teria de ser especialmente projetado. Os esquemas de relé/comunicações precisavam ser confiáveis, seguros, seletivos e sensíveis. O sistema de distribuição de 13 kV em rede primária precisaria eliminar todas as faltas em menos de 6 ciclos. Os relés microprocessados precisavam ser rápidos, permitindo o desligamento em 2 ¼ ciclos; eles precisavam ser fáceis de configurar; precisavam ser capazes de comunicar via fibra multiplexada, relé com relé e com o sistema SCADA (controle, status e analógicos), usando conexões tanto RS-485 como RS-232. Os relés tinham de ser capazes de iniciar testes da bateria da caixa de controle. Todas as funções de desligamento e fechamento dos conjuntos de manobra tinham de ser disponibilizadas através dos relés. Os relés precisavam estar em condições de realizar certas funções automáticas. Os relés deveriam permitir que esquemas de zona 1 e zona 2, primário (POTT), retaguarda (DCB) e Transferência de Disparo Direto (DTT) permaneçam ativos ao mesmo tempo. Os relés precisava ser capazes de rodar auto-diagnóstico, reportando quaisquer anormalidades de volta imediatamente através do SCADA. As comunicações necessitavam ter condições de permitir a acomodação de todas essas funções, em todos os 133 locais de conjuntos de manobra, ao mesmo tempo atendendo uma taxa de varredura de 4 segundos para todos os dados do SCADA.

A obra começou em Junho de 1999, com abertura de valas e perfuração para a instalação dos novos alimentadores e para os cabos de fibra. Os empreiteiros começaram a instalação dos armários para os equipamentos do sistema de fibra ótica. As equipes da FPC iniciaram a instalação das novas posições de alimentadores, incluindo relés direcionais, nas diferentes subestações. As turmas da FPC começaram a reformar as redes aéreas e subterrâneas. As equipes começaram trocando os conjuntos de manobra existentes por novos conjuntos de manobra, interruptores de falta, a SF_6. O pessoal de operações da FPC desenvolveu e elaborou planos de manobra. O despacho coordenou as manobras. Técnicos de relés/telecomunicações começaram a verificação do equipamento de integração. Engenheiros e programadores começaram a trabalhar na programação necessária para acomodar toda essa informação dentro do sistema SCADA. Os parceiros de fornecimento de equipamentos prosseguiram com seus esforços para entregar todo o material no prazo. Depois de um

verão longo e quente, e dois furacões, o trabalho foi concluído em 20 de Outubro de 1999, dez horas antes do prazo fatal do agressivo cronograma do projeto.

Somente através do comprometimento conjunto dos fornecedores, empreiteiros e dos funcionários da distribuição e da transmissão da FPC, pôde um projeto desta magnitude e complexidade ser satisfatoriamente concluído dentro do prazo e do orçamento. A história real contada por este projeto e este artigo é uma história de trabalho em equipe e compromisso.

Visão geral do sistema de proteção

Sistema Elétrico

O sistema de distribuição que serve a área de I-Drive é alimentado a partir de duas subestações, Sand Lake e Orangewood, mostradas esquematicamente na Figura 1. A carga atendida a partir de Sand Lake é uma combinação de cabos aéreos e subterrâneos. Os alimentadores de Orangewood são subterrâneos. Para simplificar, apenas os alimentadores são mostrados na Figura 1. As unidades de disjuntor tipicamente têm duas posições de alimentadores e duas posições de linhas de ramal para atender as cargas. Para ligações entre os anéis, são usados conjuntos de manobra com três posições de alimentador e uma linha de ramal.

Sistema de Proteção

A equipe de projeto estabeleceu diversos critérios para maximizar a confiabilidade do sistema:

- Atender à carga com um sistema confiável e tolerante a falhas;
- Automaticamente seccionar um cabo alimentador sob falta, caso contrário manter o serviço ininterrupto
- Considerar apenas os primeiros casos de contingência no sistema automático
- Isolar cada falta individual, restaurar o serviço para o máximo possível da carga dentro do menor prazo de tempo possível

Para atingir esses objetivos, nós implementamos diversos esquemas de proteção, alguns dos quais apresentam funções exclusivas. Para os alimentadores radiais aéreos/subterrâneos provenientes de Sand Lake, nós usamos um sistema de seccionalização/restauração de serviço usando comunicações *peer-to-peer* e inteligência distribuída. Para os sistemas de anéis subterrâneos, a proteção utiliza uma variedade de esquemas de proteção piloto e um esquema automático de transferência da fonte.

Comunicações

O sistema de comunicações desempenha um papel vital na funcionalidade, segurança, e confiabilidade do sistema de proteção e automação. Um anel T1 de quatro fibras, tipo *hot stand-by* (sistema de reserva ligado), auto-reparável (23 canais) foi selecionado para proporcionar plena conectividade e roteamento alternativo, caso houvesse falha do trajeto primário de comunicações. Os anéis auto-reparáveis consistem de cabo de 96 fibras e 36 multiplexadores configurados em três laços de fibra ótica que retornam para uma das duas subestações. Apenas 4 fibras, entre cada multiplexador, são utilizadas para cada anel do sistema de comunicações; as fibras restantes são guardadas para uso futuro e ficam disponíveis para serem locadas a outras empresas para as suas necessidades de comunicações.

Esses anéis de fibra, juntamente com os multiplexadores utilizados no sistema de comunicação, proporcionam:

- Um trajeto de comunicação de relé para relé. Essa comunicação relé-relé é utilizada para proteção piloto, além de transferência de informação.
- Todas as comunicações SCADA
    - Controle
    - Status / Alarmes
    - Valores analógicos

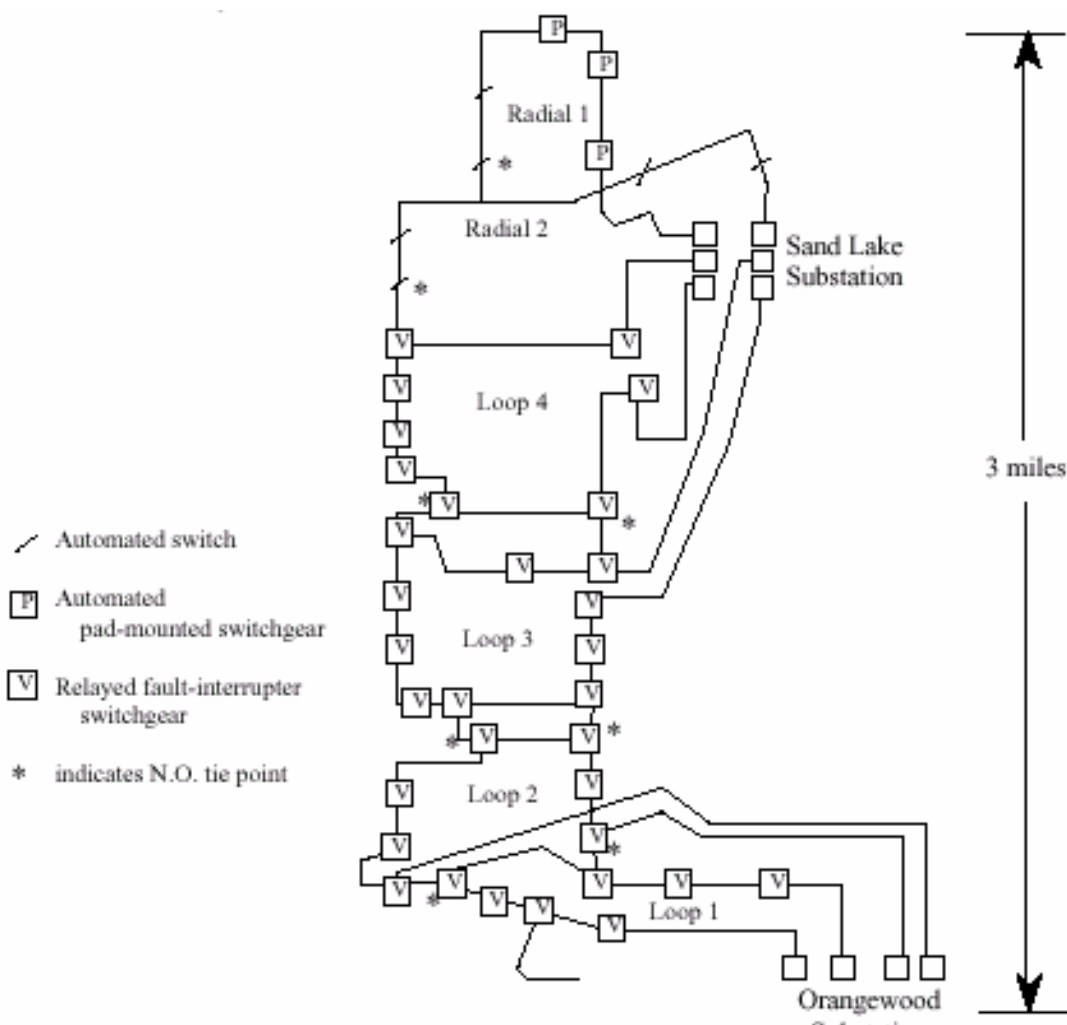
Radial 1
Radial 2
Sand Lake Substation
Loop 4
Loop 3
Loop 2
Loop 1
Orangewood
3 miles
Automated switch
Automated pad-mounted switchgear
Relayed fault-interrupter switchgear
* indicates N.O. tie point

Loop = Anel. 3 mile = 3 milhas. Automated switch=Chave automática. Automated pad-mounted switch = chave automática montada sobre base. Relayed fault-interruptor switchgear = Conjunto de manobra interruptora de fault a relé. * Indica ponto de ligação normalmente aberto.

FIGURA 1 – ALIMENTADORES DO SISTEMA DE DISTRIBUIÇÃO DO PROJETO I-DRIVE. AS LINHAS DE RAMAL PARA AS CARGAS NÃO SÃO MOSTRADAS.

As comunicações entre as chaves e relés com a subestação, são feitas através de protocolo DNP 3.0, onde os dados são concentrados e convertidos para um protocolo de modelo mais antigo para compatibilidade com o sistema SCADA existente da FPC. Era importante para os operadores do sistema disporem de um quadro preciso da configuração do sistema de distribuição a todo tempo e que as ações de manobra desejadas fossem implementadas com agilidade. Através do arranjo judicioso dos anéis de comunicação, número de canais em cada anel e número de IED's (Dispositivos Eletrônicos Inteligentes) por canal (máximo de 5), a taxa desejada de varredura de 4 segundos foi alcançada.

Da mesma forma como para o sistema de proteção, a confiabilidade é crítica e os anéis de 4 fibras, tipo *hot stand-by* e auto-reparáveis, proporcionam trajetos de comunicação redundantes muito confiáveis com rápidos tempos de restabelecimento.

Comunicações Lógicas Relé-Relé e SCADA do Sistema Subterrâneo

Cada relé é equipado com 4 portas seriais. Duas portas são utilizadas para comunicações relé-relé para suporte das funções de proteção, uma porta é usada para SCADA e a remanescente (painel frontal) é usado para interrogação local do relé. A conexão do relé ao sistema de comunicações é mostrada abaixo na Figura 2.

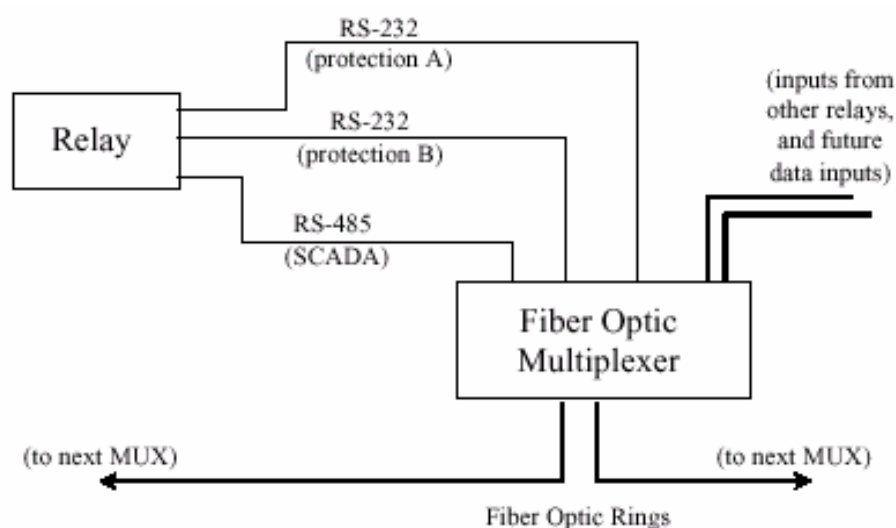
Duas portas RS-232 são utilizadas para comunicar com dois relés remotos através da rede de fibra para funções de proteção. O canal “A” é utilizado para esquemas de proteção primária e comunica com o relé no extremo oposto da seção do alimentador. O canal “B” é utilizado para esquemas de proteção de “sobrealcance” de retaguarda e se comunica com o relé no extremo distante da seção alimentadora adjacente, “buscando” uma unidade de disjuntor interveniente para fazer isso. O atraso através da rede de fibra é inferior a 1 milisegundo, enquanto o intervalo de processamento dos relés é de ¼ de ciclo. Assim, o tempo de comunicação total (entre imantação de um elemento em um local até a confirmação do recipiente pretendido) é de cerca de meio ciclo. Cada anel pode enviar e receber até oito pontos lógicos simultaneamente. Assim, podemos transmitir e receber disparo permissivo, bloqueio de disparo e transferência de disparo direto através do mesmo canal em meio ciclo.

To next MUX = Para mux seguinte. Fiber optic multiplexer = Multiplexador de fibra ótica
inputs from other relays... = Entradas de outros relés e futuras entradas de dados.

FIGURA 2 – CONEXÃO DE RELÉ NA REDE DE COMUNICAÇÕES DE FIBRA ÓTICA.

A terceira porta serial é RS-485 endereçável e é utilizada para controle e telemetria do SCADA. Valores analógicos (tensão, corrente e potência), pontos de status e alarmes são transmitidos de volta para o concentrador de dados na SE. O controle remoto das posições das chaves pelos operadores também é obtido por comunicações através desta porta. Todas as portas RS-485 em uma localização geográfica são conectadas em “rede em cascata”, antes da conexão no multiplexador de fibra ótica, para conservar os canais lógicos no multiplexador e conservar os requisitos de hardware.

Comunicações do Sistema de Comutação Inteligente

A mesma rede de fibra ótica que é utilizada para o sistema subterrâneo é utilizada para os sistemas de comutação inteligentes. Cada controlador de chave possui três portas RS-232, uma para a programação local e duas para comunicações externas. Utilizando essas portas, os controladores de chaves são conectados cada qual no seguinte, com a rede de fibra ótica proporcionando uma conexão "virtual" física de um controlador para o seguinte. A existência da rede de fibra ótica interveniente é transparente para os controladores de chaves. O primeiro ou último controlador da seqüência comunica informação do SCADA de volta para o concentrador de dados da subestação, novamente através da rede de fibra ótica.

Proteção de Sistema de Anéis Subterrâneos

Cada um dos quatro alimentadores de anéis subterrâneos usa princípios de proteção "piloto" para produzir eliminação de faltas automática, em alta velocidade. Os esquemas de proteção piloto utilizam relés equipados com elementos de sobrecorrente direcionais, ligados uns nos outros por uma rede de fibra de alta velocidade. Os relés também proporcionam proteção de retaguarda para faltas nos alimentadores de ramais. Figura 1 mostra o diagrama unifilar dos alimentadores principais do sistema de distribuição. Para simplificar, as linhas de ramal que atendem as cargas não são mostradas na Figura. Tipicamente o disjuntor nos anéis subterrâneos possuem dois alimentadores e duas linhas de ramal; os conjuntos de manobra situados de modo a permitir ligações entre anéis terão três alimentadores e uma linha de ramal. As seções de cabos alimentadores, entre unidades de conjuntos de manobra, são tratadas como seções da linha, da mesma forma como em um sistema de transmissão. As seções de cabos variam em extensão de cerca de 20 pés a vários milhares de pés.

Os esquemas de proteção piloto aplicados são:

- POTT (Transferência de disparo de sobrealcance permissivo)
- DCB (Bloqueio de comparação direcional)
- Esquemas de sobrealcance POTT/DCB
    - Retardado para coordenar com os dispositivos dos lados da fonte e da carga

Os equipamentos de proteção em cada disjuntor consistem de:

- Relés de sobrecorrente direcionais com zonas múltiplas, lógica programável e lógica de comunicação relé-relé para cada linha de alimentador
- Controles de sobrecorrente para cada linha de ramal
- Multiplexador de rede de Fibra Ótica com entradas múltiplas para RS-232, RS-485 e conexões de fibra diretas.

Os relés direcionais usam um elemento direcional baseado em impedância negativa adaptativa ou de seqüência zero, para faltas desbalanceadas, e um elemento polarizado de tensão de seqüência positiva, para faltas trifásicas.

Esquema POTT (Transferência de Disparo de Sobrealcance Permissivo)

O esquema de transferência de disparo de sobrealcance permissivo utiliza elementos de fase "forward looking" e direcional de terra (67P2 e 67G2), em cada extremo da seção da linha, conforme indicado na Figura 3. Se ocorrer uma falta direta, os elementos direcionais transmitem (KEY) um sinal de disparo permissivo para o terminal remoto. Se for detectada uma falta direta e um sinal permissivo é recebido do terminal remoto, o interruptor de faltas é desligado e um sinal de transferência de disparo direto é enviado ao terminal remoto, desde que o sinal de comunicação seja bom. O sinal permissivo também é transmitido para uma condição de disjuntor aberto (52B). A lógica de controle POTT é ilustrada na Figura 4. "A" indica canal de comunicações A.

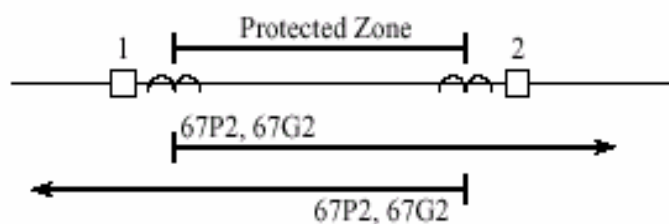



FIGURA 3 – PROTEÇÃO BÁSICA DO ESQUEMA POTT

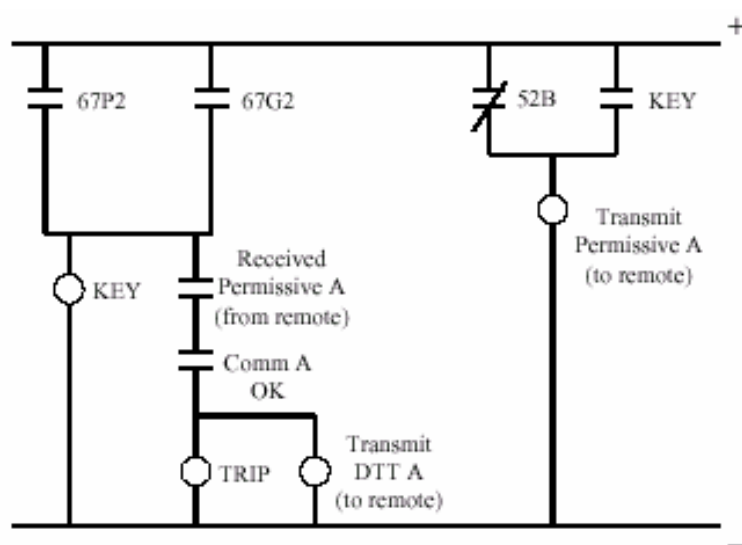



FIGURA 4 – REPRESENTAÇÃO DE CIRCUITO DE CONTROLE DA LÓGICA POTT

ESQUEMA DCB (BLOQUEIO DE COMPARAÇÃO DIRECIONAL)

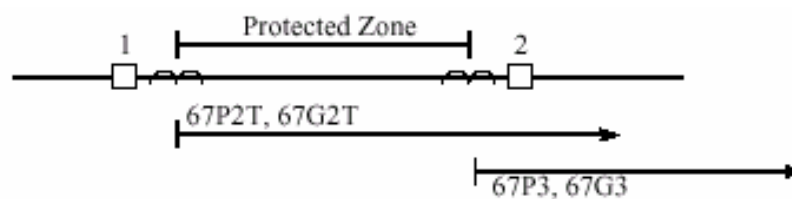



FIGURA 5 – PROTEÇÃO BÁSICA DO ESQUEMA DCB

O esquema de bloqueio de comparação direcional (DCB) é utilizado em conjunto com o esquema POTT. O esquema utiliza elementos de sobrecorrente direcionais, direto e reverso, de fase e de terra (67P2T, 67G2T; direto 67P3, 67G3 reverso), conforme indicado na Figura 5. Um curto retardo (3 ciclos) é adicionado aos elementos diretos para dar tempo para a geração, transmissão e processamento do sinal de bloqueio. Se uma falta direta é detectada e um sinal de bloqueio proveniente do terminal remoto não tiver sido recebido, nós emitimos um disparo e uma transferência de disparo direto para o terminal remoto, desde que o canal de comunicação esteja bom. Os elementos reversos (67P3, 67G3) transmitem um sinal de bloqueio para o terminal remoto. Elementos de bloqueio são ajustados com mais sensibilidade do que os elementos de alcance direto remotos, para evitar sobre-disparo. A lógica do controle DCB é ilustrada na Figura 6.

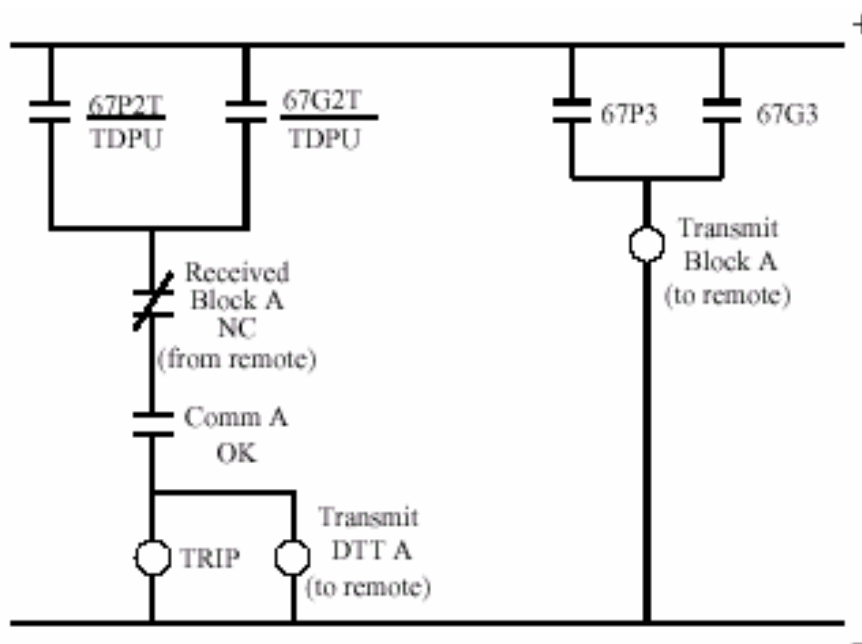



FIGURA 6 – REPRESENTAÇÃO DE CIRCUITO DE CONTROLE DA LÓGICA DCB

Ambos os esquemas (POTT e DCB) são operacionais a todo tempo. O esquema POT é mais rápido, porém manter o DCB em serviço assegura que nenhuma alteração de configuração precisa ser feita para operação do sistema de potência com anel aberto (radial).

Proteção de Retaguarda Usando Esquema POTT/DCB de Sobrealcance

A proteção para o caso de possibilidade de falha de relé, bateria ou outro equipamento, foi considerada como alta prioridade. Um dos cenários é, se ocorrer o caso de avaria ou indisponibilidade de um disjuntor inteiro (por exemplo, acidente com veículo)?

A proteção de retaguarda coordenada de tempo padrão (sem comunicação) não seria possível devido a um número de dispositivos em série. Assim, nós implementamos um esquema POTT/DCB com sobrealcance para servir de backup aos esquemas POTT/DCB primários, usando um trajeto de comunicação adicional.

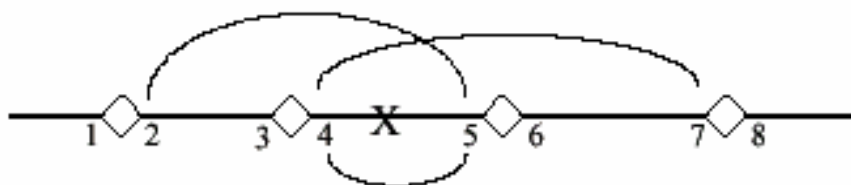



FIGURA 7 – CENÁRIOS DE DESLIGAMENTO PARA ESQUEMA POTT/DCB COM SOBREALCANCE; "X" INDICA O LOCAL DA FALTA

Na Figura 7, para a falta mostrada o esquema primário desligaria os disjuntores 4 e 5 e os dois esquemas com sobrealcance desligariam 2 e 5 e 4 e 7, respectivamente.

O esquema POTT/DCB de retaguarda com sobrealcance funciona igual aos esquemas POTT e DCB primários, exceto que é usado um elemento de sobrecorrente de tempo inverso (51PT, 51GT). A

característica inversa coordena com a proteção da linha ramal (características similares a fusível) e também permite que os esquemas POTT e DCB primários operem e enseja um retardo de coordenação para o sinal de bloqueio DCB de sobrealcance. Na Figura 8, os elementos 67P4, 67G4, 67P2 e 67G2 são elementos direcionais diretos; 67P3 e 67G3 são elementos direcionais reversos.

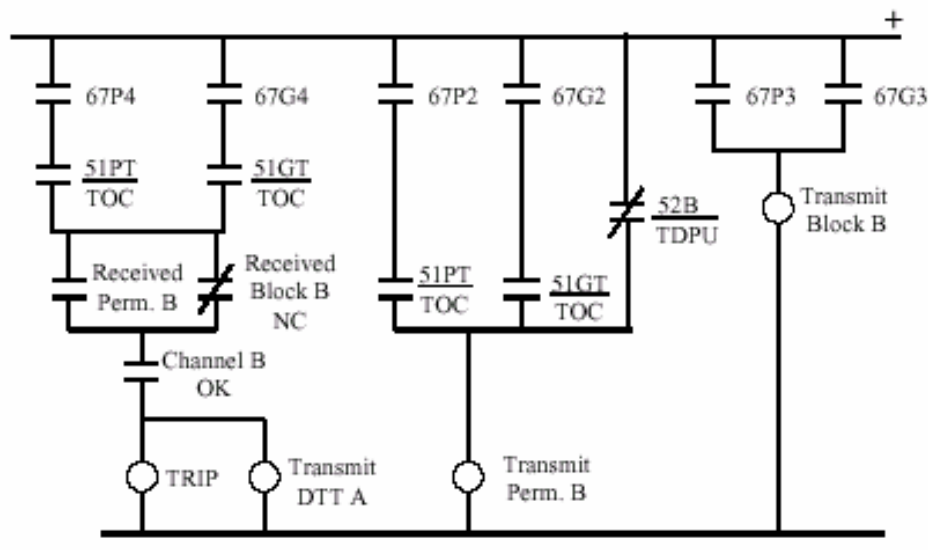



FIGURA 8 – REPRESENTAÇÃO DE CIRCUITO DE CONTROLE DO ESQUEMA POTT/DCB DE SOBREALCANCE

Observe que o canal B é utilizado para o esquema de comunicações de sobrealcance, e o canal A para os esquemas primários.

PROTEÇÃO PARA FALHA DO DISJUNTOR

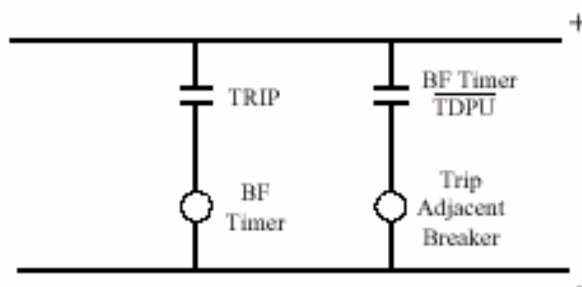



FIGURA 9 – REPRESENTAÇÃO DO CIRCUITO DE CONTROLE DO ESQUEMA DE FALHA DE DISJUNTOR

Se uma condição de desligamento persistir por 10 ciclos (Temporizador BF), nós iniciamos uma condição de falha do disjuntor (BF). Essa condição:

- Desliga todos os outros interruptores do alimentador no disjuntor (indicado como “disjuntor adjacente”) no diagrama lógico, Figura 9).
- Emite uma transferência de disparo direta para o terminal remoto e desliga.

Num cenário de falha do disjuntor, BF irá “competir” com os elementos POTT/DCB de sobrealcance. Tendo em vista que os elementos POTT/DCB de sobrealcance operam em uma curva de tempo inverso, é possível que a proteção de falha do disjuntor opere mais rápido, impedindo um sobredisparo.

Para a falta mostrada na Figura 10, e uma falha do disjuntor em 4:

- Disjuntor 3 desliga diretamente, 2 por transferência de disparo direta (DTT)
- 2 e 5 desligam pelos seus respectivos esquemas de sobrealcance POTT/DCB (3 e 4 por DTT)
- 4 e 7 desligam pelo outro esquema POTT/DCB de sobrealcance (5 e 6 por DTT). Observe que 7 não irá desligar em seu esquema de sobrealcance se a falta já tiver sido liberada por 5 no esquema POTT/DCB primário; tampouco irá 6 receber DTT de 7.

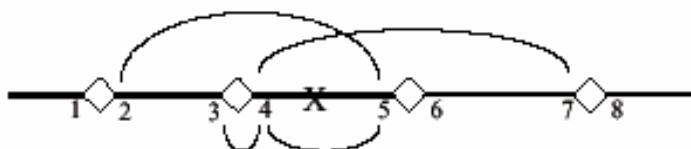



FIGURA 10 – CENÁRIOS DE DESLIGAMENTO PARA ESQUEMA DE FALHA DO DISJUNTOR; “X” INDICA A LOCALIZAÇÃO DA FALTA

PROTEÇÃO DE LINHA DE RAMAL

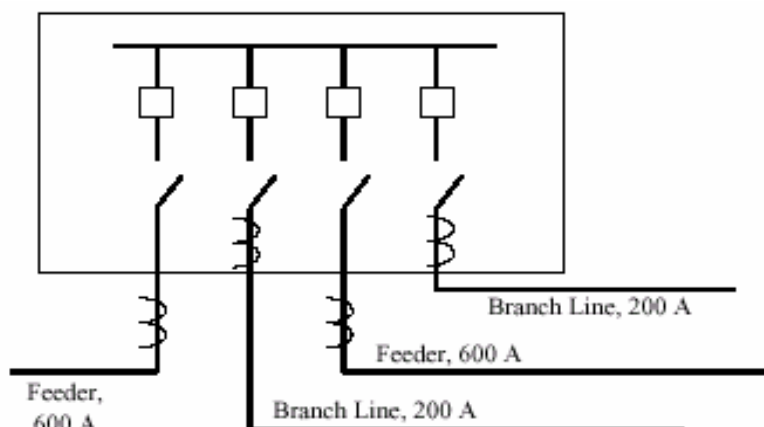



FIGURA 11 – DIAGRAMA UNIFILAR DE CONJUNTO DE MANOBRA MOSTRANDO ALIMENTADORES DE 600 A E LINHAS DE RAMAL DE 200 A

Cada linha de ramal radial (normalmente duas por unidade de disjuntor, conforme ilustrado na Figura 11) é protegida por um interruptor de faltas a vácuo, com um dispositivo de controle de sobrecorrente. Um controle de sobrecorrente proporciona controle de desligamento para as duas linhas de ramal de 200 A, com ajustes separados para cada linha. As características de tempo-corrente (TCC) são similares a um fusível, exceto que não é afetado por temperatura ou pré-carga, apresenta um regime contínuo mais alto e pode ser aplicado para desligar uma fase ou três fases. Este relé é alimentado a partir dos TC’s internos para força de controle e energia de desligamento – não sendo necessária bateria. O relé da linha de ramal é coordenado com fusíveis de elo fraco do lado da carga, e opera para eliminar faltas acima da capacidade dos fusíveis. A experiência operacional até à data tem mostrado que, com os níveis de corrente de falta no sistema, o tempo total de eliminação de faltas é de 2 ½ ciclos, quando a proteção da linha de ramal opera.

Observe que enquanto os TC’s são externos para os relés do alimentador, os TC’s da linha de ramal são internos aos conjuntos de manobra. Assim, a proteção da linha de ramal inclui a bucha da linha, cotovelo e cabo. (Uma falta no cotovelo do alimentador é ordinariamente protegida pela zona de

proteção da falta. Com uma condição de disjuntor aberto, o cotovelo da falta estará também na zona POTT primária). Também, em alguns locais, a corrente de carga foi superior a 200 A. Para aqueles locais, conjuntos de manobra possuindo 3 posições de alimentadores foram usados, exceto que o relé na posição de carga foi programado para desligamento de sobrecorrente-tempo não direcional para proporcionar uma linha ramal de 600 A.

Proteção contra Falta no Barramento

De modo a proteger para faltas de disjuntores no barramento do disjuntor, incluindo as ligações do cotovelo nos alimentadores, e como retaguarda para a proteção da linha ramal, mais um esquema foi adicionado como indicado na Figura 12. Tendo em vista que cada seção de linha do alimentador é equipada com elementos de sobrecorrente direcional, nós usamos uma detecção de falta reversa (32PR, 32GR), e não direta (!67P2, !67G2) na linha adjacente, para determinar as condições de desligamento. Além disso, esses elementos precisam coordenar com linhas de ramal para evitar desligamentos para faltas no ramal, e assim aplicamos elementos de sobrecorrente inversos (TOC) (51PT, 51GT). Além da condição "não direta", desligamento também é habilitado por um disjuntor adjacente aberto (52B).

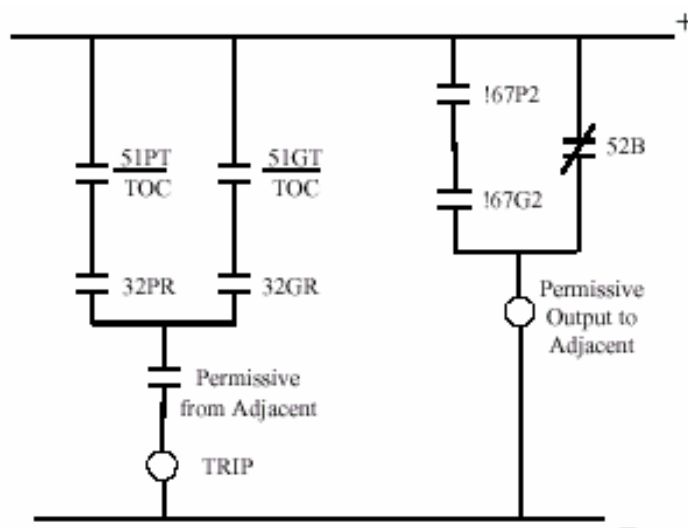



FIGURA 12 – APRESENTAÇÃO DE CIRCUITO DE CONTROLE PARA LÓGICA DE FALTA DE BARRAMENTO

Para a falta de barramento mostrada na Figura 13, o desligamento pode ocorrer por dois esquemas:

- 3 e 4 desligam pelo esquema de falta no barramento e enviam DTT a 2 e 5, respectivamente
- 2 e 5 são desligados por POTT/DCB de sobrealcance, e 3 e 4 por DTT.

Ambos os esquemas podem desligar. No entanto, eles estão desligando os mesmos disjuntores, de modo que os requisitos de proteção são atendidos. "Todo mundo ganha a corrida".

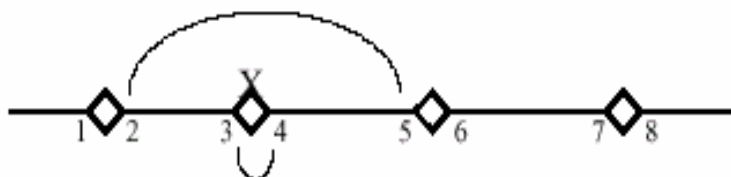



FIGURA 13 – CENÁRIO DE DESLIGAMENTO POR FALTA NO BARRAMENTO; "X" INDICA A LOCALIZAÇÃO DA FALTA

TRANSFERÊNCIA AUTOMÁTICA DE FONTE

Um esquema final foi implementado para proteger contra perda de um barramento da subestação na SE Orangewood. Uma transferência automática de fonte faz a conexão do Anel 1 para Anel 2 no caso de qualquer um desses dois anéis perder a sua fonte normal. A Subestação de Orangewood possui dois barramentos com um disjuntor de ligação; a ligação do barramento automaticamente fecha no caso de perda de um transformador da subestação. O Anel 1 é alimentado a partir de um barramento, e o Anel 2 a partir do outro. No caso de perda de um transformador da Subestação, a comutação automática do ramal ocorre e o serviço é restabelecido para ambos os anéis. No entanto, no caso de uma falta no barramento, o diferencial da barra irá eliminar a falta, porém não haverá fonte para o barramento anel alimentado pelo barramento sob falta. Neste caso, o disjuntor que conecta no anel seguinte irá detectar a perda da fonte de suas duas posições de alimentador normalmente fechadas; após um retardo de tempo para coordenar com o restabelecimento da subestação, o alimentador de ligação irá fechar, desde que haja tensão presente na fonte alternativa. A lógica de controle é ilustrada na Figura 14. O esquema é intertravado para prevenir fechamento caso a perda de tensão seja causada pela ocorrência de uma falta. Também, se o fechamento automático não ocorrer durante a curta janela de oportunidade (por exemplo, se a fonte alternativa ainda não está disponível), não haverá nenhum fechamento. O esquema será restabelecido pelo retorno da tensão nos alimentadores normais. A abertura do interruptor automaticamente fechado é executada pelos operadores do sistema através do SCADA ou manualmente. Este esquema é implementado nas quatro unidades de disjuntor de 3 alimentadores, que conectam o Anel 1 no Anel 2. Para correta operação do esquema, um dos dois alimentadores “de ponta” entre esses dois anéis tem de ser normalmente alimentado a partir do Anel 1 e o outro normalmente alimentado a partir do Anel 2, de modo que é importante que os pontos normalmente abertos, conforme mostrado na Figura 1, sejam mantidos. Esses esquema de transferência automática não é implementado nos Anéis 3 e 4 porque a Subestação Sand Lake usa um esquema de disjuntor e meio para proporcionar proteção contra perda de uma barra da subestação ou transformador.

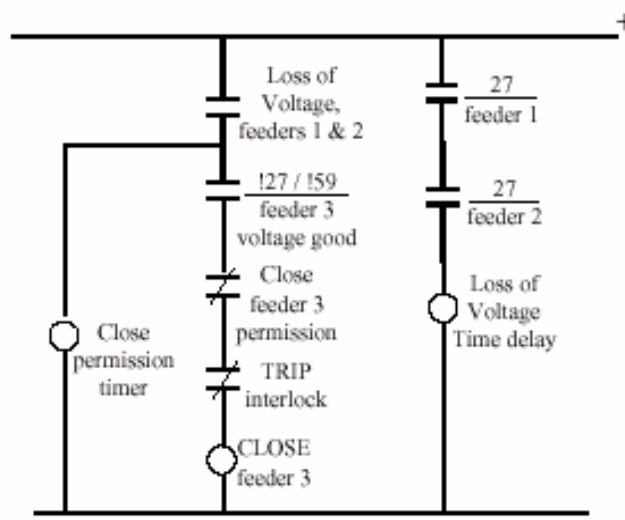



FIGURA 14 – REPRESENTAÇÃO DE CIRCUITO DE CONTROLE DA LÓGICA DE TRANSFERÊNCIA AUTOMÁTICA DE FONTE

SECCIONALIZAÇÃO AUTOMÁTICA E SISTEMA AUTOMÁTICO DE RESTABELECIMENTO DO SERVIÇO

Na área norte do sistema, a densidade de carga não é tão alta e é utilizada a distribuição aérea. Uma vez que as cargas são geograficamente dispersas, o uso do disjuntor, interruptor de faltas, não é possível nessa área. No lugar disso, sistemas de manobra inteligentes foram implantados em dois “grupos”, para proporcionar transferência automática sob condições de perda da fonte, seccionalização automática dos elementos de circuito sob falta e restabelecimento automático do serviço para as cargas das seções boas da linha. Um alimentador é de construção aérea, enquanto o outro apresenta tanto uma seção subterrânea quanto uma seção aérea. Os controladores inteligentes operam chaves de abertura de carga, conjuntos de manobra montados sobre base ou chaves a SF_6 nas linhas aéreas. Esses dois grupos são mostrados esquematicamente no diagrama unifilar parcial da Figura 15. Unidades de disjuntor montadas sobre base possuem duas chaves controladas por controlador.

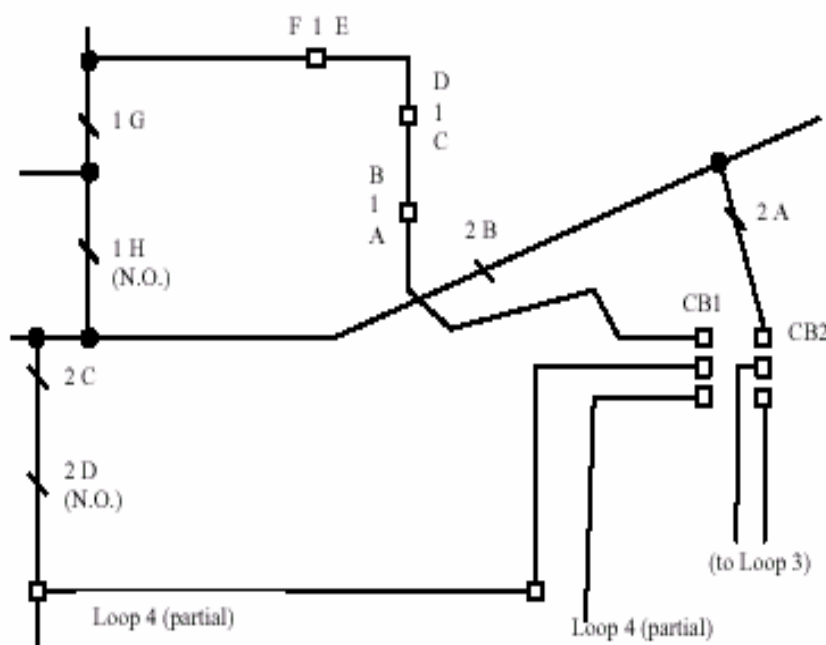



FIGURA 15 – DIAGRAMA UNIFILAR PARCIAL DOS SISTEMAS DE MANOBRA INTELIGENTES. O GRUPO 2 AÉREO TAMBÉM SERVE DE FONTE ALTERNATIVA PARA O GRUPO 1; O ANEL 4 SUBTERRÂNEO PROPORCIONA A FONTE ALTERNATIVA PARA GRUPO 2

Os controladores de chave usam comunicações *peer-to-peer* e acomodam rádio, conexão física direta ou fibra ótica. Na área da International Drive, a comunicação via rádio foi desprezada por causa da interferência por descargas atmosféricas e a preocupação das futuras construções causarem interferência com o canal de comunicação pelo rádio. Foi decidido usar uma conexão física “virtual” interfaceando os controladores com a mesma rede de fibra ótica multiplexada usada no sistema de proteção subterrâneo. Usando a comunicação *peer-to-peer*, todos os controles de chave ouvem as mensagens de todos os outros controladores, porém cada um responde somente às mensagens endereçadas a ele.

Os controladores de chave de cada grupo compartilham e continuamente atualizam a informação da base de dados a respeito da situação do grupo, a presença de tensão boa, e carga do sistema de potência. Cada membro do grupo em seguida atualiza a sua cópia da base de dados com nova informação recebida de um membro vizinho e com novos dados provenientes dos sensores de corrente e tensão em sua própria localização; as atualizações são então passadas para o membro do grupo vizinho no outro lado. Deste modo, todos os membros dos grupos estão continuamente

informados do status de os outros membros e da carga do sistema de potência em todo o sistema. A interrogação do status e carregamento de todo o grupo é feita através de SCADA ou no campo, visualizando o display de cristal líquido em qualquer dos controles de chaves.

O isolamento básico da falta opera como um esquema de seccionalização aplicado em um sistema radial / anel, com um ponto normalmente aberto. Para o alimentador aéreo (radial 2), o disjuntor da subestação é ajustado para quatro desligamento (três religamentos) antes de bloquear. As chaves controladas são configuradas no campo com níveis de partida de sobrecorrente de fase e de terra, e para seccionalização de 3 atuações. Quando ocorre uma falta, as chaves no lado da falta correspondente à fonte irá detectar a sobrecorrente seguida pela perda da tensão quando o disjuntor opera. Chaves no lado da falta, correspondente à carga, detectam a perda de tensão sem sobrecorrente. Os dois primeiros religamentos (um instantâneo e outro temporizado) permitem a eliminação das faltas transitórias sem a reconfiguração do circuito. Após o número ajustado de atuações, as chaves automaticamente e autonomamente abrem durante o tempo morto do circuito (ou seja, enquanto o disjuntor está aberto) para isolar a seção da linha sob falta – não é requerida comunicação para que a seccionalização inicial ocorra. O religamento final do disjuntor restaura o serviço até à primeira chave; a ação de seccionalização das chaves isola a falta para prevenir bloqueio do disjuntor na posição aberta. (A exceção é uma falta permanente entre o disjuntor da subestação e a primeira chave, sendo que neste caso o disjuntor opera até o bloqueio para completamente isolar a falta). Na medida que cada chave abre, ela comunica com as outras (relatório não solicitado por exceção) que ela abriu e por que, se devido a “falta” ou simplesmente “perda da tensão”. Cada controlador pode então determinar a localização da falta para o restabelecimento automático subseqüente do serviço. Faltas transitórias que podem ocorrer devido a descargas disruptivas em isolares durante as tempestades com relâmpagos, são liberadas pela operação do disjuntor e o serviço é restabelecido a todos os consumidores, permitindo os dois primeiros religamentos sem seccionalização. As faltas permanentes devidas, por exemplo, a queda de linhas ou quebra do equipamento, são isoladas por ação autônoma de seccionalização das chaves. Os controles inteligentes continuam a atualização da base de dados compartilhada, indicando o novo status das chaves e o motivo para a operação de abertura; isto é, se a abertura foi causada como resultado de uma falta ou apenas por causa de perda de tensão. O controlador inteligente também detecta condições de desbalanceamento, tais como poderiam ser causadas por condutores de fase abertos. O controlador irá operar a sua chave para isolar a seção da linha sob tais condições, desde que a sua corrente esteja dentro do regime da chave. No alimentador subterrâneo/aéreo, a operação é similar exceto que o disjuntor é ajustado para três desligamento e bloqueio (dois religamentos) e as chaves são ajustadas para duas tentativas de seccionalização. As faltas temporárias podem ocorrer na seção aérea, de modo que uma tentativa de religamento é razoável. Porém, tendo em vista que as faltas provavelmente não são transitórias na parte subterrânea, religamentos adicionais irão apenas aumentar o dano causado por faltas nesta seção.

O restabelecimento automático de serviço ocorre depois que a linha tiver sido satisfatoriamente seccionalizada para isolar a seção sob falta. Usando informação da base de dados compartilhada, cada controlador determina a localização da falta e toma a decisão de fechar com a fonte alternativa ou de volta com a fonte original, deixando a linha da seção sob falta aberta. A carga efetiva pré-falta da linha é conhecida de cada controlador e esta informação previne sobrecarga da fonte alternativa. A chave somente fecha se a carga adicional a ser colocada não fizer o total exceder o limite pré-ajustado configurado no campo. No caso mais oneroso, a carga inteira será colocada sobre a fonte alternativa. O tempo de restabelecimento do serviço automático é inferior a 60 segundos.

Após restabelecer o serviço para o máximo possível de consumidores, o sistema de comutação entra em um estado de “não pronto”. O status da chave e os dados analógicos (tensão, corrente) são sempre comunicados de volta para os operadores do sistema pelo SCADA, de modo que a sala de controle também fique imediatamente ciente da perturbação. Depois que o sistema de potência é reparado, os operadores do sistema dão o sinal para “retorno ao normal”. O retorno automático ao normal também é possível quando as chaves detectam retorno da tensão para a seção da linha originalmente sob falta. Essa opção foi desautorizada porque os operadores preferiram manter controle da comutação de volta para configuração normal. O sistema de manobra então reconfigura para o estado normal. Uma transição fechada (paralelismo de circuitos durante o retorno ao normal) foi selecionado para evitar “piscar” os consumidores, como ocorreria durante uma transição aberta.

SUMÁRIO

Um alto número de faltas causadas por falhas de cabos e acidentes durante escavações precipitaram a necessidade de um sistema de distribuição de alta confiabilidade para a área de laser chamada Internacional Drive, ao sul de Orlando na Flórida. Um sistema de rede primária foi implementado na parte subterrânea do sistema usando conjuntos de manobra a vácuo, isolados por SF_6, controlados por relés baseados em microprocessadores. Esquemas de proteção implementados incluíram POTT/DCB primário, POTT/DCB com sobrealcance de retaguarda, proteção para falta no barramento, falha de disjuntor e transferência automática da fonte. Esquemas primários liberam as faltas de alimentador em 6 ciclos ou menos. Nas partes aérea e mista aérea/subterrânea do sistema de distribuição, um sistema de manobras inteligente foi implementado para seccionalizar uma seção de linha com falta e automaticamente reconfigurar para restabelecer o serviço para as seções boas no prazo de 60 segundos ou menos. Ambos os sistemas proporcionam controle SCADA, status e dados analógicos de volta para o centro de controle do sistema para informação em tempo real a respeito de status e carga do sistema. As comunicações para proteção com relés e SCADA foram implementadas usando um sistema multiplexador de fibra ótica. Os dados para o sistema de proteção são transmitidos de ponta a ponta com atraso inferior a ½ ciclo; para SCADA, a taxa de varredura de 4 segundos foi alcançada. O sistema ótico usa uma topologia de anel a 4 fibras, em *hot-standby*, com trajetos redundantes e fibras redundantes para maior confiabilidade. O sistema de proteção e controle foi comissionado dentro do prazo e orçamento, atendendo a um cronograma de instalação muito agressivo. Foi somente através do comprometimento e do trabalho em equipe dos fornecedores, empreiteiros e empregados da FPC na distribuição e transmissão, que este projeto foi bem sucedido.

REFERÊNCIAS

Barry Pagel, “Energizing International Drive,” *T&D Magazine*, April 2000.

Jeff Roberts, Karl Zimmerman, “Trip and Restore Distribution Circuits At Transmission Speeds,” *25th Annual Western Protective Relay Conference*, Spokane, Washington, October, 1998.

Armando Guzman, Jeff Roberts, Daqing Hou, “New Ground Directional Elements Operate Reliably for Changing System Conditions,” *23rd Annual Western Protective Relay Conference*, Spokane, Washington, October, 1996.

Dan Nordell, “Application of Distribution Intelligence Techniques to Automatic Feeder Sectionalizing and Restoration,” *DistribuTECH ’99*, San Diego, California, January 1999.

“5800 Series Automatic Switch Control with IntelliTEAM User’s Manual,” EnergyLine Systems, Inc., Alameda, California.